

不同正极材料锂离子电池烤箱热滥用数值模拟研究

孙忆琼^{1,2}, 彭 鹏^{1,2}, 蒋方明^{1,2}

(1.中国科学院 可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640;

2.中国科学院 广州能源研究所 先进能源系统实验室, 广东 广州 510640)

摘要:借助锂离子电池烤箱热滥用模型,模拟了 LiCoO_2 、 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$ 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 五种不同正极材料与电解液反应时的反应程度及热生成速率的变化;模拟了五种不同正极材料对应锂离子电池的单层电芯在不同烤箱温度下的热行为;分析了锰酸锂电池电芯在烤箱实验模拟中不同反应的热生成速率,分析了电芯升温的主要原因。结果表明:不同正极材料的热稳定性不同,热安全性存在差异;正极材料与电解液的反应放热是引起电芯升温的主要原因,也是造成电池热失控的主要原因。

关键词:锂离子电池;烤箱热滥用;正极材料;数值模拟

中图分类号: TM 912.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-087 X(2015)06-1165-06

Numerical simulation study on oven thermal abuse of lithium-ion batteries with various cathode materials

SUN Yi-qiong^{1,2}, PENG Peng^{1,2}, JIANG Fang-ming^{1,2}

(1.Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2.Laboratory of Advanced Energy Systems, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The evolution of reaction degree and heat generation rate of the reactions between five cathode materials [LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$, $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$, LiMn_2O_4 , LiFePO_4] with electrolyte was simulated using oven thermal abuse model for lithium ion batteries, and the thermal behaviors of these lithium ion batteries with various cathode materials under different oven temperature were analyzed. The heat generation rate of various exothermic reactions and the main reason for temperature rise were analyzed for manganese oxide lithium battery during oven tests. The results show that the thermal stability and safety of cathode materials are different. The cathode-electrolyte reaction heat is the major reason for temperature rise and thermal runaway.

Key words: lithium ion battery; oven thermal abuse; cathode material; numerical simulation

锂离子电池的安全性问题在其推广应用的过程中备受关注。为提高其安全性,现有大量利用实验方法分析电池材料,特别是正极材料的热稳定性的研究。Veluchamy等^[1]通过热重分析仪(TGA)和差式扫描量热仪(DSC)研究指出, Li_xCoO_2 与电解液的反应在60~125℃存在微弱的放热反应峰;MacNeil等^[2]采用绝热加速量热仪(ARC)和X射线衍射(XRD)方法研究 $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ 的热稳定性, $\lambda\text{-Mn}_2\text{O}_4$ 在高浓度 LiPF_6 环境中因HF含量增加其热稳定性会降低;Belharouak等^[3]比较了 $\text{Li}_{0.53}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 与两种不同电解液的反应,测定了反应的起始温度、峰值温度与反应焓;Jiang等采用ARC研究了不同粒径、满充的 LiFePO_4 与电解液 $\text{LiPF}_6/(\text{EC}+\text{DEC})$ 或 $\text{LiBOB}/(\text{EC}+\text{DEC})$ 的反应,发现粒径对于热稳定性无影响;Xiang等较

系统地比较了包括 $\text{Li}_x\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 、 Li_xFePO_4 等不同正极材料与电解液1 mol/L $\text{LiPF}_6/(\text{EC}+\text{DMC})$ 的反应,结果表明各充电态正极材料在高温下释氧程度是影响其安全性的主要因素。美国Sandia国家实验室利用ARC测得五种不同正极材料的锂离子电池在烤箱热滥用中的放热曲线。

数值模拟是研究锂离子电池热滥用的重要手段。Kim等^[4]通过构建锂离子电池的三维热滥用模型,研究电池内部化学反应的扩散过程,得出电池尺寸是影响烤箱实验中电池热行为的一个重要因素;Lai等^[5]建立了锂离子电池的三维非稳态热滥用模型,并对三种不同荷电状态电池进行烤箱实验模拟,提出了判别电池热安全性的临近曲线分析方法。

以上研究没有利用数值模拟方法对不同正极材料的锂电池在烤箱实验中的热行为进行综合系统的预测和分析。基于此,本文利用本实验室开发的锂离子电池的三维热滥用模型^[6]模拟 LiCoO_2 、 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$ 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 五种不同正极材料的电池在不同烤箱实验温度下的热行为,比较分析五种不同正极材料电池的热稳定性和安全性。

收稿日期:2014-12-13

基金项目:中国科学院可再生能源重点实验室基金(y30791001);中国科学院“百人计划”项目(FJ)(y107y51001)

作者简介:孙忆琼(1989—),女,山东人,硕士生,主要研究方向为锂离子电池安全性。

1 计算模型

1.1 物理模型

针对方形锂离子电池的单层电芯,建立热模型,如图1所示,单层电芯厚度为196 μm,尺寸为196 μm×0.065 m×0.1 m,其中厚度方向上从左到右依次是负极集流体(Cu)、负极、隔膜、正极以及正极集流体(Al),各层厚度分别为9、59、20、92和16 μm。

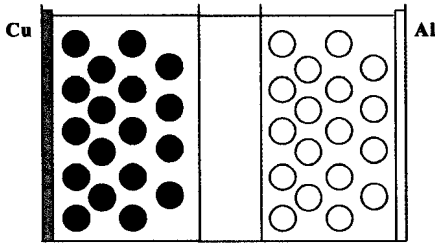


图1 锂离子电池单层电芯物理模型

1.2 能量守恒方程

能量守恒方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + Q \quad (1)$$

式中: ρ 为电池材料密度,kg/m³; c_p 为比热容,J/(kg·K); T 为温度,K; t 为时间,s; k 为导热系数,W/(m·K); Q 为滥用过程中电池内部各项放热反应的单位体积热生成速率,W/m³。复合电极(包括隔膜)的热物性根据各组容积分额进行加权求和确定。表1~表2汇总了电池各部分材料的热物性^[7]。表3列出了电极和隔膜各组分的容积份额。

锂离子电池不同电芯位置的散热条件不同。其中,最外层电芯与外界进行对流和辐射换热,内部电芯只能与紧邻位置电芯相互导热。将以上各种散热方式等效为对流换热,电池内部的电芯取较小的等效换热系数,靠近电池表面电芯取较大的等效换热系数,则统一的换热边界条件为:

$$q_{conv} = h(T_{surf} - T_{amb}) \quad (2)$$

表1 电池材料热物性

参数	负极			隔膜	正极		电解液
	铜	石墨	粘合剂	PP/PE/PP	铝	粘合剂	LiPF ₆ (EC+DMC+EMC)
ρ (kg·m ⁻³)	8 900	2 660	1 750	492	1 500	1 750	1 290
c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	385.0	1 437.4	1 120.0	1 978.0	903.0	1 120.0	133.9
k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	3 980.000	1.040	0.120	0.334	238.000	0.120	0.450

表2 电池正极材料热物性

参数	LiCoO ₂	LiNi _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05} O ₂	Li _{1.1} (Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3}) _{0.9} O ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
ρ (kg·m ⁻³)	2 500	4 581	2 380	4 202	3 600
c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	700	651	710	672	1 369
k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.48	6.10	1.50	6.20	1.58

表3 电极和隔膜各组分的容积份额

项目	负极			隔膜		正极	
	电解液	石墨	粘合剂	电解液	PP/PE/PP	电解液	LiCoO ₂
体积分数/%	30.1	52.3	17.6	40.0	60.0	27.7	52.3

式中: h 为等效换热系数; q_{conv} 为单位面积散热量,W/m²; T_{surf} 为电芯外表面温度,K; T_{amb} 为烤箱温度或近邻电芯温度,K。本计算中取等效换热系数 $h=1.5$ W/(m²·K),对应于电池(多层电芯组成)中位置较内部电芯的散热条件。

1.3 热滥用反应模型

不考虑燃烧反应,在锂离子电池烤箱热滥用过程中,存在四种可能的放热反应,分别为固液膜分解反应、负极材料与电解液反应、正极材料与电解液反应以及电解液的分解反应。式(1)中 Q 的计算如下:

$$Q = Q_{sei} + Q_{ne} + Q_{pe} + Q_{ele} \quad (3)$$

式中: Q_{sei} 为滥用过程中电池内部固液膜分解反应的单位体积热生成速率,W/m³; Q_{ne} 为负极与电解液反应的单位体积热生成速率,W/m³; Q_{pe} 为正极与电解液反应的单位体积热生成速率,W/m³; Q_{ele} 为电解液分解反应的单位体积热生成速率,W/m³。表4汇总了不同反应控制方程。

锂离子电池在滥用条件下发生的热失控现象可能与正极-电解液反应放热密切相关,正极与电解液的反应是影响锂离子电池安全性的重要一环。本文考虑了多种不同正极材料

表4 不同放热反应的反应控制方程^[8]

反应类型	产热率	反应方程
固液膜 (SEI膜) 分解 反应	Q_{sei}	$Q_{sei} = H_{sei} W_c R_{sei}$
		$R_{sei}(T, c_{sei}) = A_{sei} \exp\left[-\frac{E_{a,sei}}{RT}\right] c_{sei}^{m_{sei}}$
		$\frac{dc_{sei}}{dt} = -R_{sei}$
负极与 电解液 反应	Q_{ne}	$Q_{ne} = H_{ne} W_c R_{ne}$
		$R_{ne}(T, c_e, c_{neg}, t_{sei}) = A_{ne} \exp\left[-\frac{t_{sei}}{t_{sei,ref}}\right] c_{neg}^{m_{ne}} \exp\left[\frac{E_{a,ne}}{RT}\right]$
		$\frac{dt_{sei}}{dt} = R_{ne}$
		$\frac{dc_{neg}}{dt} = -R_{ne}$
电解液 分解 反应	Q_{ele}	$Q_{ele} = H_{ele} W_e R_e$
		$R_e(T, c_e) = A_e \exp\left[-\frac{E_{a,e}}{RT}\right] c_e^{n_e}$
		$\frac{dc_e}{dt} = -R_e$
正极与 电解液 反应	Q_{pe}	$Q_{pe} = H_{pe} W_p R_{pe}$
		$R_{pe}(T, \alpha, c_e) = A_{pe} \alpha^{m_{pe}} (1-\alpha)^{n_{pe}} \exp\left[-\frac{E_{a,pe}}{RT}\right]$
		$\frac{d\alpha}{dt} = R_{pe}$

的电池,正极与电解液的反应可用相同控制方程描述,只是控制方程中参数的取值不同。计算中主要参数取值如表5~表6所示。

2 结果与讨论

通过模拟 LiCoO_2 、 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$ 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 五种不同正极与电解液反应时反应程度和热生成速率随温度的演化,研究并揭示材料的热稳定性及热安全性差异。另外,还对五种不同正极材料锂离子电池进行烤箱热滥用过程数值模拟,模拟其单层电芯在不同烤箱温度下的热量生成和传输,探讨和分析不同正极材料电池热失控机制。

2.1 不同正极材料与电解液的反应

借助于锂离子电池烤箱热滥用模型,只考虑正极与电解液的反应,模拟其反应程度与热生成速率的变化,如图2所示,不同正极与电解液发生完全反应的起始温度不同, LiCoO_2 、 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$ 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 反应的起始温度分别为 175、200、255、270 和 260 °C。反应起始温度不同表明其热稳定性存在差异, LiMn_2O_4 的热稳定

表5 计算参数^[4]

符号	描述	数值
H_{sei}	放热量/(J·kg ⁻¹)	2.570×10^5
H_{ne}		1.714×10^6
H_{ele}		1.550×10^5
A_{sei}	反应频率因子/s ⁻¹	1.667×10^{15}
A_{ne}		2.500×10^{13}
A_e		5.140×10^{25}
$E_{a,sei}$	反应活化能/(J·mol ⁻¹)	1.350×10^5
$E_{a,ne}$		1.350×10^5
$E_{a,e}$		2.740×10^5
c_{sei0}	初始值	0.15
c_{neg0}		0.75
α_0		0.04
c_e0		1.00
m_{sei}		1.00
$m_{ne,n}$	反应级数	1.00
$m_{pe,p1}$		1.00
$m_{pe,p1}(\text{LiFePO}_4)$		1.92
$m_{pe,p2}$		1.00
$m_{pe,p2}(\text{LiFePO}_4)$		0.67
m_e		1.00
W_c	物质含量/(kg·m ⁻³)	5.470×10^3
W_e		3.832×10^2

表6 正极材料与电解液反应的计算参数^[9-10]

参数	LiCoO_2	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	$\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$	LiMn_2O_4	LiFePO_4
$H_{pe}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.140×10^5	2.180×10^5	7.900×10^5	4.000×10^5	1.947×10^5
A_{pe}/s^{-1}	6.667×10^{13}	7.250×10^{16}	2.250×10^{14}	1.060×10^{18}	2.000×10^8
$E_{a,pe}/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	1.396×10^5	1.300×10^5	1.540×10^5	2.180×10^5	1.030×10^5
$W_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.300×10^3	1.274×10^3	1.293×10^3	1.167×10^3	0.960×10^3

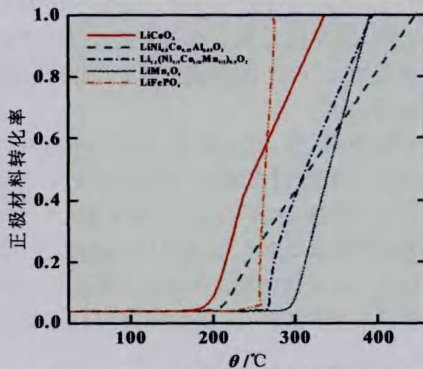


图2 不同正极材料与电解液反应的进行程度

性最高。反应完全时,不同材料的温升也不一样, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 的温升最大, LiFePO_4 的温升最小,分别为 210 和 15 °C,这是由于不同正极与电解液完全反应的热生成量不同。

如图3所示, LiCoO_2 、 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_{1.1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})_{0.9}\text{O}_2$ 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 的最大热生成速率分别为 7、53、80、50、1.6 W。各材料的热生成速率不同导致其温升的差异,进而影响其安全性。 LiFePO_4 与电解液反应的起始温度为 260 °C 左右,小于 LiMn_2O_4 反应的起始温度,但由于其反应的热生成速率远远小于其它材料,热安全性最好。

2.2 热滥用过程电芯温度变化

取等效对流换热系数 $h=1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,电芯的初始温度为 25 °C,分析比较不同烤箱温度所导致电芯表面温度的变化。

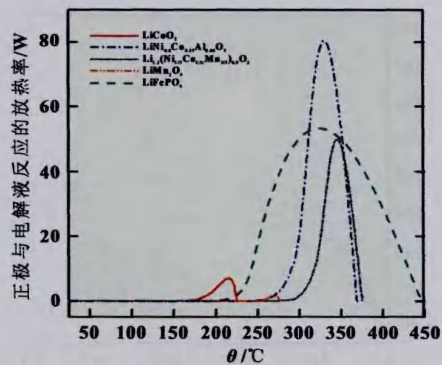
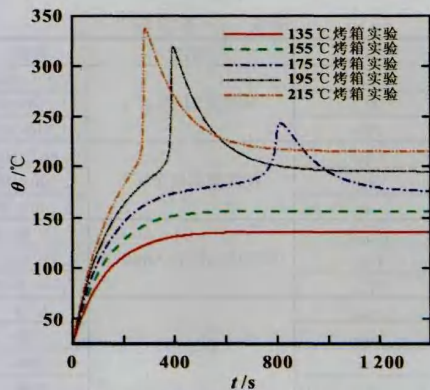


图3 不同正极材料与电解液反应的热生成速率

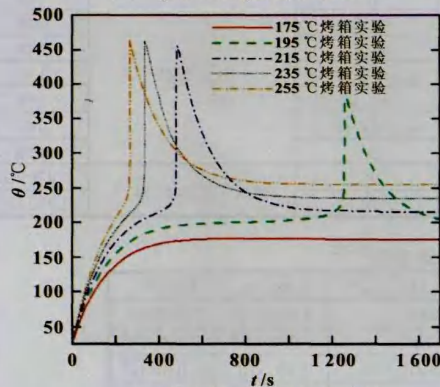
如图4(a)所示,烤箱环境温度较高时, LiCoO_2 电芯被加热到环境温度后,内部化学反应迅速释放的热量因无法及时散失到临近电芯或周围环境中而大量堆积,引起温度急剧升高的热失控现象。在 175、195 和 215 °C 的烤箱温度下, LiCoO_2 电芯出现急剧升温,随后下降到与烤箱温度一致。其中,215 °C 的烤箱温度下的温升达 115 °C。

烤箱温度越低,内部放热反应越慢,热量能及时地向临近电芯或周围环境散失,而不易堆积,热失控的最大温升越小。当环境温度低于某一值时,电芯温度将不会突然升高而造成热失控。如图4(a)所示,当烤箱温度为 155 和 135 °C 时,电芯表面温度加热到烤箱温度后保持不变,不会出现热失控。

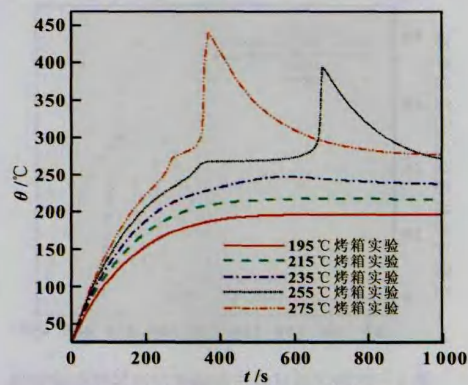
如图4所示,不同正极材料锂电池发生热失控的临界条



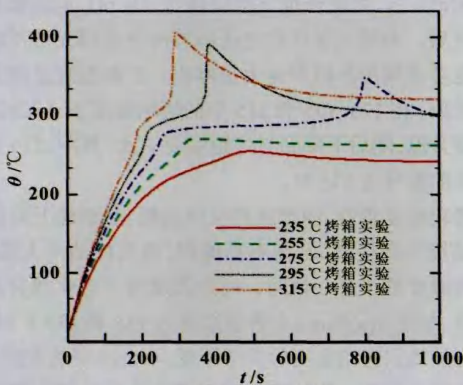
(a) LiCoO₂ 锂离子电池



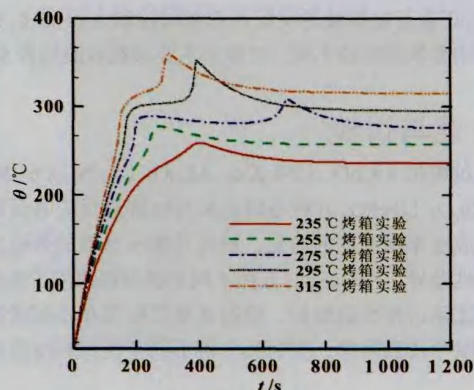
(b) LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ 电池



(c) Li_{1.1}(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})_{0.9}O₂ 电池



(d) LiMn₂O₄ 电池



(e) LiFePO₄ 电池

图4 不同烤箱温度下不同正极材料锂电池电芯表面温度变化

件不同, LiCoO₂、LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂、Li_{1.1}(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})_{0.9}O₂、LiMn₂O₄ 四种材料发生热失控的可能温度分别为 175、195、255 和 275 °C, LiFePO₄ 在不同温度的烤箱实验中, 最大温升为 275 °C 的烤箱温度实验中的温升约 40 °C, 出现热失控的可能性不大。LiFePO₄ 电池的热安全性优于其他四种电池。

2.3 热滥用过程放热反应及热源分析

通过比较不同反应的反应程度及热生成速率, 可以辨识出热滥用过程中放热量最大的热源。温度对反应速率有决定性的影响。以下分析主要针对 LiMn₂O₄ 电池 275 和 255 °C 烤箱热滥用过程。

如图 5(a)所示, 在 255 和 275 °C 的烤箱模拟中, 固液膜的分解反应开始时间均为 50 s 左右。前者反应完成的时间为 100 s, 后者为 70 s。因此, 在较高温度下, 固液膜分解反应完全所需时间差别不大。

如图 5(b)所示, 在 100 s 附近, 负极与电解液的反应在电芯被加热到一定程度时被触发, 负极中嵌锂的无量纲含量开始下降。275 °C 烤箱温度下, c_{neg} 的下降速度大于 255 °C 时的下降速度, 表明烤箱温度越高, 分解反应越剧烈。如图 4(d)所示, 800 s 左右时, 275 °C 烤箱模拟中电芯表面温度达到峰值, 随后下降, 导致反应剧烈进行, c_{neg} 急剧下降约 50 s, 之后基本保持不变。

如图 5(c)所示, 因正极的金属氧化物在 270 °C 以上才容易分解释放氧, 与电解液发生反应, 255 °C 的烤箱模拟中正极材料与电解液反应的 α 增加较慢。而在 275 °C 的模拟烤箱中, 在初始阶段的缓慢反应之后, 电芯温度的升高导致反应剧烈进行, 其转化率在 800 s 左右达到 1, 反应结束。

如图 5(d)所示, 在 255 和 275 °C 的烤箱模拟中, 200 s 左右时, 电芯温度达到电解液分解反应的触发温度, 反应随即剧烈发生, c_e 迅速减小。255 °C 烤箱温度中反应完全所需时间为 150 s, 高于 275 °C 烤箱温度下的 50 s, 两者相差较大。

由图 5 可知, 烤箱温度为 255 °C 时, 放热反应均不剧烈, 热生成速率慢、产生的少量热量可以通过散热及时释放到环境中, 因此, 电芯表面温度到达环境温度后保持不变; 烤箱温度为 275 °C 时, 负极和电解液的反应、电解液的分解反应均在 200 s 附近出现放热过程, 电芯出现小幅快速升温; 800 s 附近,

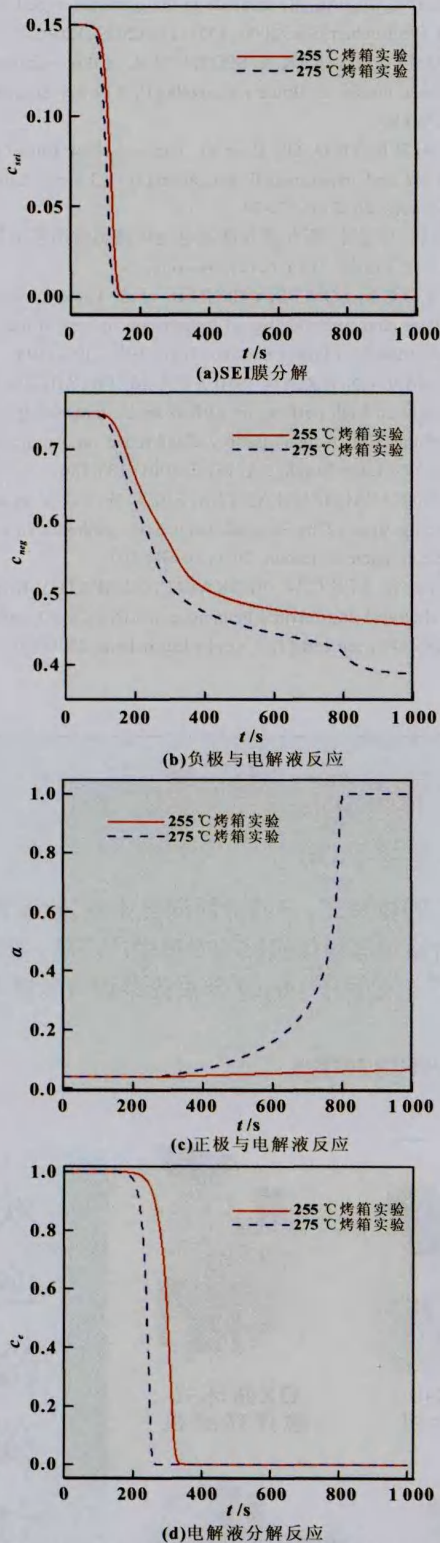


图5 255和275℃烤箱中电芯内部反应进行程度比较

正极与电解液的反应开始进行,放出大量的热,热生成速率很大,热量在短时间内无法释放到环境中,电芯温度急剧升高,

最终可能导致热失控。

进一步对比上述两过程中不同反应的热生成速率,如图6(a)所示,在烤箱温度为255℃时,正极与电解液未发生反应;固液膜分解反应在80s附近开始发生,热生成速率峰值在110s附近,放热量在反应结束时减小到0;电解液分解反应在200s附近开始,在300s左右达到峰值,随后急剧下降;负极与电解液的反应较平缓,分别在180和310s附近出现峰值。其中,放热量最大的反应是电解液的分解反应,最大热生成速率达1.8W。如图6(b)所示,除正极与电解液反应的放热量在800s左右出现峰值外,275℃烤箱实验的各反应的变化趋势与255℃烤箱温度下的一致。放热量最大的反应是正极和电解液的反应,最大值可达到8.7W。因此,正极与电解液的反应是造成热失控的主要热量来源。

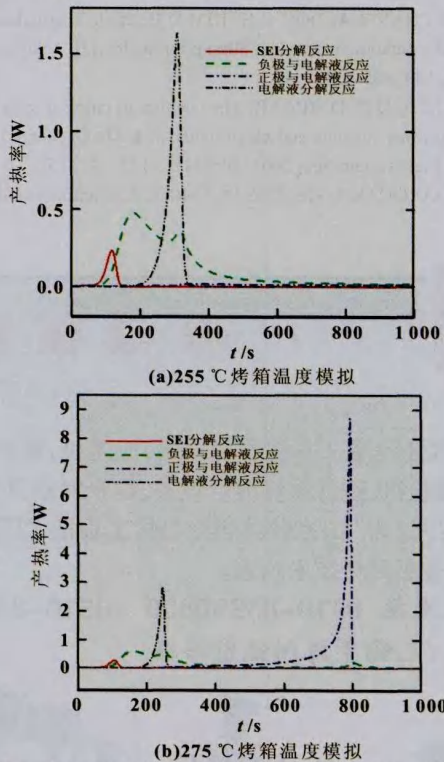


图6 LiMn₂O₄电池电芯在255和275℃烤箱温度下不同热源的热生成速率

3 结论

本文借助锂离子电池烤箱热滥用的热模型,模拟五种不同正极材料与电解液反应时的反应程度变化与热生成速率的变化。在此基础上,对五种不同正极材料对应的锂离子电池进行烤箱热滥用数值模拟,模拟单层电芯在不同烤箱温度下的温度变化。

模拟结果显示, LiCoO₂、LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂、Li_{1.1}(Ni_{1/3}Co_{1/3}-Mn_{1/3})_{0.9}O₂、LiMn₂O₄、LiFePO₄五种不同正极材料与电解液发生完全反应的临界温度分别为:175、200、255、270和260℃,完全反应的放热速率分别为:7.53、80、50、1.6W。与电解液完全反应的临界温度越高,材料的热稳定性越好;完全反应的放热

速率越小,材料的热安全性越高。因此, LiMn_2O_4 的热稳定性最高,而 LiFePO_4 的热安全性最好。

通过对 LiMn_2O_4 电池烤箱热滥用模拟中不同反应的反应程度和热源分析发现,温度升高时,反应程度的加剧导致热生成速率升高,当热量无法及时散发到环境中时就可能会发生热失控。热生成速率最大的反应是正极和电解液的反应,并且放热量远远大于另外三个反应。由此推断,正极与电解液的反应是造成热失控的主要热量来源。

正极材料的热稳定性和热安全性差异是造成不同正极材料锂电池在热滥用模拟中温度变化不同的主要原因。采用热稳定性好、热安全性高的正极材料能够有效阻止锂电池热失控的发生。

参考文献:

[1] VELUCHAMY A, DOH C H, KIM D H, et al. Thermal analysis of Li_2CoO_2 cathode material of lithium ion battery[J]. J Power Sources, 2009, 189: 855-858.
 [2] MACNEIL D D, DAHN J R. The reaction of charged cathodes with nonaqueous solvents and electrolytes: II LiMn_2O_4 charged to 4.2 V [J]. J Electrochem Soc, 2001, 148(11): A1211-A1215.
 [3] BELHAROUAK I, VISSERS D, AMINE K. Thermal stability of the

$\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05})\text{O}_2$ cathode in the presence of cell components[J]. J Electrochem Soc, 2006, 153(11): A2030-A2035.

[4] KIM G, PESARAN A, SPOTNITZ R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells [J]. J Power Sources, 2007, 170: 476-489.
 [5] LAI P F, YE Q, QU B, et al. Thermal abuse model of lithium ion cells and experimental validation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36: 71-74.
 [6] 彭鹏,孙忆琼,蒋方明. 钴酸锂电池烤箱热滥用模拟及热行为分析 [J]. 化工学报, 2014, 65(2): 647-657.
 [7] GUO G F, LONG B, CHENG B, et al. Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application[J]. J Power Sources, 2010, 195: 2393-2398.
 [8] LAMPE-ONNERUD C, SHI J, CHAMBERLAIN R, et al. Benchmark study on high performing carbon anode materials [C]// Proceedings of the 16th Annual Battery Conference on Applications and Advances. Long Beach, CA: IEEE, 2001: 133-136.
 [9] VENKATACHALAPATHY R, LEE C W, LU W, et al. Thermal investigations of transitional metal oxide cathodes in Li-ion cells[J]. Electrochem Commun, 2000(2): 104-107.
 [10] LU W, LEE C W, VENKATACHALAPATHY R, et al. Electrochemical and thermal behaviour of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ cathode in sealed 18650 Li-ion cells[J]. J Appl Electrochem, 2000(30): 1119.



产品博览

电池材料粉体加工设备

广告

无锡新光粉体科技有限公司

本公司是一家制作搅拌磨,压滤机,震动筛,喷雾造粒塔、粉体加工、三元材料混合设备、包覆改性设备、混粉机、磷酸铁锂混合设备、纳米材料分散机、钴酸锂混合设备等粉体机械的专业生产厂家。2005年正式授权为“国家特种超细粉体工程技术研究中心试验基地”。公司于06、07年度光荣评为无锡市级和江苏省级高新技术企业。

联系电话:0510-83390800 0510-83390111 13912377893

地址:无锡市前洲镇前石路



SP-3超细混合机



真空搅拌机



SX搅拌球磨机



VC-5混合机



QX循环式搅拌球磨机



SM-110超细磨



V型混料机



VS-6融合机



FM-300高效混合机

欢迎洽谈订购